جغرافیا و مخاطرات محیطی، شماره سی و دوم، زمستان ۱۳۹۸

صص ۳۶- ۱۹

DOI: https://doi.org/10.22067/geo.v0i0.81836

مقاله پژوهشی

پهنه‌بندی خطر زمین لغزش با استفاده از تلفیق روش‌های Hot Spot، ANP و WlC (مطالعه موردی: شهرستان خلخال)

موسی عابدینی[1]- استاد ژئومورفولوژی دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

الناز پیروزی- دانشجوی دکتری مخاطرات ژئومورفولیک، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۴/۲۰ تاریخ تصویب: ۱۳۹۸/۶/۲۵

چکیده

زمین لغزش‌ها ازجمله مخاطرات طبیعی هستند که همه‌ساله موجب خسارات جانی و مالی زیاد، به‌ویژه در نواحی کوهستانی می‌شوند. شهرستان خلخال با داشتن چهرهٔ کوهستانی و با توجه به وضعیت زمین‌شناسی، فیزیوگرافی، اقلیمی و انسانی، عمده شرایط لازم جهت شکل‌گیری حرکات لغزشی را داراست؛ لذا هدف تحقیق حاضر، پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در این شهرستان می‌باشد. در این مطالعه ابتدا، عوامل مؤثر جهت ایجاد لغزش در منطقه شناسایی شدند و سپس نسبت به تهیهٔ لایه‌های اطلاعاتی در سامانه اطلاعات جغرافیایی اقدام گردید. در مرحله بعد وزن‌دهی عوامل مورد بررسی، با استفاده از روش ANP و در محیط نرم‌افزار Super Decision انجام گردید و تحلیل و مدل‌سازی نهایی با استفاده از روش تحلیل لکه‌های داغ به عنوان روش آمار فضایی و نیز روش WLC به عنوان یکی از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره، انجام شد. نتایج مطالعه نشان داد، عوامل شیب، کاربری اراضی، بارش و لیتولوژی به ترتیب با ضریب وزنی ۰/۶۶۳، ۰/۶۴۶، ۰/۶۳۹ و ۰/۳۷۹ بیش‌ترین تأثیر را بر ایجاد زمین‌لغزش در شهرستان خلخال دارند. همچنین، با توجه به نتایج به دست آمده به ترتیب ۲۴۹/۳۳، ۳۸۵/۰۸ و ۴۲۷/۱۴ کیلومترمربع از مساحت محدوده، در طبقات لکه داغ، با ضریب اطمینان ۹۹، ۹۵ و ۹۰ درصد، قرار دارند.

کلیدواژه‌ها: خلخال، زمین لغزش، Hot Spot،ANP، WLC.

۱ نویسنده مسئول: ۰۹۱۴۳۵۵۵۲۲۶ Email: Abedini@uma.ac.ir

۱- مقدمه

هر رویداد ژئومورفولوژیک را که اثر نامطلوب اجتماعی، اقتصادی بر سیستم زندگی انسان برجای می‌گذارد، می‌توان یک خطر ژئومورفیک نامید (Alcantara,2002). از میان انواع حرکات دامنه‌ای، زمین‌لغزش‌ها ازجمله شایع‌ترین خطرات طبیعی‌اند و دارای بیشترین خسارات انسانی و زیست‌محیطی می‌باشند (Dhakal et al.,2000). لغزش عبارت است از پایین افتادن یا حرکت یکپارچه و اغلب سریع حجمی از مواد رسوبی در امتداد دامنه‌ها (محمودی،۱۳۸۲). بنا بر تعریف انجمن زمین‌شناسی مهندسی، زمین لغزش عبارت است از جابه‌جایی به سمت پایین توده‌ای از مواد بر روی یک شیب (نصیری،۱۳۸۳). مکانیسم فعالیت این پدیده بدین گونه است که در سازندهای ریزدانه (رس، مارن و شیل) در اثر جذب آب، خاصیت کلوئیدی مواد بهم می‌خورد و تا محلی که رطوبت نفوذ کرده باشد، خاک از توده اصلی جدا شده و در نتیجه نیروی ثقل در روی دامنه حرکت می‌کند (احمدی،۱۳۸٦). این فرآیندها تحت تأثیر عوامل متعدد طبیعی از قبیل دینامیک درونی و بیرونی زمین و نیز فعالیت‌های انسانی از قبیل بارگذاری مواد بر روی دامنه، معدن‌کاوی، احداث سد، مخازن آب و عوارض خطی از قبیل جاده‌ها، راه‌آهن، خطوط لوله نفت و گاز و مواردی از این دست ایجاد می‌شوند. رویداد این حرکات جزء فرآیندهای شکل‌زایی زمین محسوب می‌شود، ولی با این وصف، وقتی ناپایداری دامنه‌ها و حرکات توده‌ای مواد بر روی دامنه‌ها در ارتباط با انسان و ساخت‌وسازهای بشری و مراکز سکونتی و فعالیت‌های وی صورت می‌گیرد، به عنوان بلایا و سوانح طبیعی قلمداد می‌شوند و گاهی وقوع آنها موجب خسارات فراوانی اعم از جانی و مالی در گوشه و کنار جهان می‌گردد (هدایی، ۱۳۸۱).

اما، نکته‌ای که بایستی بدان توجه کرد، این است که زمین لغزش‌ها ازجمله بلایایی هستند که می‌توان آن‌ها را پیش‌بینی نمود و از خسارات و آسیب‌های جانی و مالی ناشی از آن جلوگیری کرد. برای این منظور روش‌های متعددی وجود دارد که پهنه‌بندی از مهم‌ترین آن‌هاست. پهنه‌بندی خطر زمین لغزش، ترسیم نقشه نواحی با احتمال یکسان وقوع در زمان معینی می‌باشد. از این طریق سطح زمین به نواحی مجزایی از درجات بالفعل و بالقوه خطر (بسیار کم تا بسیار زیاد) تقسیم می‌شود (Bell & Glade, 2004). به‌طور مسلم پهنه‌بندی خطر حرکات دامنه‌ای گامی مهم در ارزیابی خطرهای محیطی به شمار می‌رود و نقش غیر قابل انکار را در مدیریت حوضه‌های رودخانه‌ای و کوهستانی ایفا می‌نماید (Sakar et al., 1995). بنابراین شناخت عوامل مؤثر بر زمین لغزش و پهنه‌بندی خطرات ناشی از آن در مناطق مختلف از نیازهای اساسی و بسیار مهمی است که برنامه‌ریزان به آن محتاج می‌باشند (رنجبر،۱۳۸۸). شهرستان خلخال، به لحاظ وضعیت خاص منطقه، مانند توپوگرافی (داشتن چهرهٔ کوهستانی)، شیب زیاد، وجود مواد سطحی سست و نامقاوم بر روی سازندهای مقاوم و شرایط اقلیمی (به ویژه به علت بارش‌های بهاری و نیز ذوب برف‌ها در فصل بهار) از پتانسیل بالایی برای وقوع زمین لغزش برخوردار است و حادثه‌خیزترین منطقهٔ استان، از نظر

زمین‌لغزش،می‌باشد. از آن جهت که وقوع لغزش‌ها، منجر به آسیب‌ها و خسارات متعدد، ازجمله تخریب راه‌های ارتباطی، آسیب به مناطق مسکونی و فرسایش و هدر رفتن منابع با ارزش خاک در منطقه می‌گردد؛ بنابراین مطالعه عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش و پهنه‌بندی سطح شهرستان از لحاظ پتانسیل بالقوه و بالفعل، جهت ارائه راه‌حل‌ها و شیوه‌های مناسب جهت مهار و کنترل زمین‌لغزش ضروری به نظر می‌رسد.

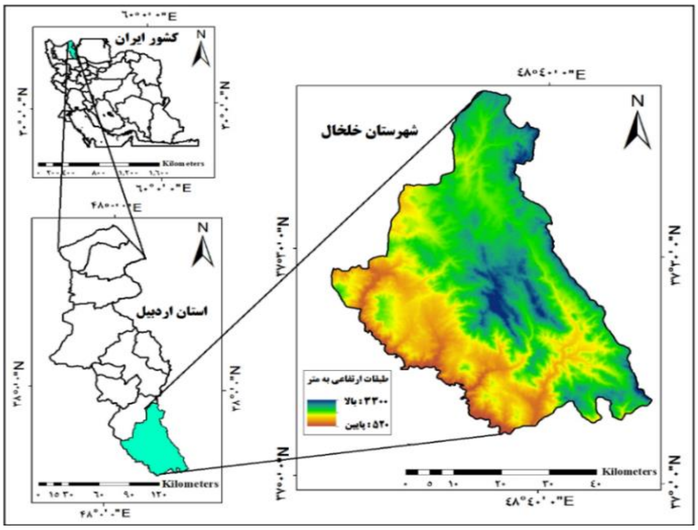
مطالعات ارزنده‌ای، به ویژه در سال‌های اخیر، به منظور بررسی زمین‌لغزش‌ها در نواحی مختلف ایران و جهان، صورت گرفته است. برای مثال: کریمی سنگ‌چینی و همکاران (۱۳۹۰)، در حوضه چهل‌چای استان گلستان، از روش‌های WLC، AHP و رگرسیون لجستیک و روش آماری چند متغیره، به منظور پهنه‌بندی ریسک‌پذیری زمین لغزش استفاده کرده‌اند، نتایج نشان داد که مدل ترکیب خطی وزنی بعد از روش آماری از مطلوبیت بالایی برخوردار می‌باشد. پیروزی و همکاران (۱۳۹۱)، در مطالعه‌ای پهنه‌بندی خطر زمین لغزش را در حوضهٔ آبخیز آق لاقان چای با استفاده از روش WLC، انجام دادند. با توجه به نتایج مطالعه، طبقه با خطر زیاد و بسیار زیاد به ترتیب ۳۶ و ۸ درصد از کل مساحت حوضه را شامل می‌شوند. امیر احمدی و همکاران (۱۳۹٤)، مطالعه‌ای را تحت عنوان پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از مدل ANP در حوضه پیوەژن دامنهٔ جنوبی بینالود انجام دادن. با توجه به نتایج مطالعه، عوامل فاصله از رودخانه و جاده بیش‌ترین وزن را به خود اختصاص دادند و همچنین مدل ANP، به عنوان مدلی مناسب و کارآمد برای پیش‌بینی لغزش معرفی شده است. کردوانی و همکاران (۱۳۹٦)، به ارزیابی خطر زمین‌لغزش در حوضه آبخیز اوغان استان گلستان، با استفاده از روش ANP پرداختند. طبق نتایج مطالعه، ۲۹ درصد حوضه در محدوده خطر زیاد و خیلی زیاد قرار دارند و به ترتیب عوامل شیب، لیتولوژی و فاصله از جاده مهم‌ترین عوامل دخیل در زمین لغزش می‌باشند. بهاروند و همکاران (۱۳۹٦)، با استفاده از روش WLC، به پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوضه ده سفید لرستان پرداختند و نتایج مطالعه نشان داد، به ترتیب ۳/٦۹ و ۲۹/٤۳ درصد از محدوده در کلاس خطر خیلی زیاد و زیاد قرار دارند. همچنین در این مطالعه با استفاده از شاخص احتمال تجربی مطلوبیت عملکرد مدل WLC مورد تأیید قرار گرفته است. بهاوند و همکاران (۱۳۹۷)، در مطالعه‌ای به مطالعه زمین‌لغزش در حوضه وارک لرستان، با استفاده از روش ترکیب خطی وزن‌دار (WLC)، پرداختند. نتایج مطالعه نشان داد که به ترتیب ۲۱/۹۰ و ۹/۵۲ درصد از مساحت حوضه در طبقات خطر زیاد و خیلی زیاد قرار دارند و بیشترین حساسیت به خطر لغزش در قسمت‌های شمال، شمال‌غرب و جنوب غرب منطقه واقع شده است.Neaupane & Piantanakulchai (۲۰۰٦)، در ارتفاعات Siwalik (در بخش شرقی نپال)، به ارزیابی خطر لغزش با استفاده از روش ANP پرداختند. در این مطالعه عوامل سنگ‌شناسی، زاویه شیب، شیب، زمین‌شناسی، نزدیکی به رودخانه به عنوان عوامل دخیل در وقوع زمین‌لغزش در نظر گرفته شده و در نهایت کارایی روش ANP، جهت مطالعه زمین لغزش‌ها مورد پذیرش واقع شده است. Kouli et al (۲۰۱۰)، در حوضه ریتمنو جزیره ایسلند، پهنه‌بندی خطر زمین لغزش را با استفاده از مدل WLC انجام دادند و

به این نتیجه رسیدند که روش ترکیب خطی وزنی روش مناسبی جهت مطالعه و پهنه‌بندی زمین لغزش‌ها می‌باشد. Abedi Gheshlaghi & Feizizadeh(۲۰۱۷)، با استفاده از ANP و منطق فازی، خطر زمین لغزش را حوضه آذرشهر مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعه عوامل شیب، جهت شیب، ارتفاع، سنگ‌شناسی، کاربری اراضی، چگالی گیاه، بارش، فاصله از گسل، فاصله از جاده و فاصله از رودخانه به عنوان عوامل مؤثر در نظر گرفته شده است و طبق نتایج مطالعه، در مجموع ۲۳/۲۲٪ از منطقه، به وسعت ۱۰۵/۳۸ کیلومترمربع، در طبقه پرخطر و بسیار پرخطر قرار دارد. Tajudin et al (۲۰۱۸)، در Ulu Kelang، واقع در کشور مالزی، با استفاده از GIS و سنجش از دور و عوامل شیب، جهت شیب، زمین شناسی، کاربری اراضی و به ویژه با تاکید بر نقش بارش، به مطالعه زمین لغزش پرداختند. نتایج مطالعه در ۵ ردهٔ خطر بسیار کم تا بسیار زیاد به دست آمد و کارایی روش WLC، با توجه به رخدادهای زمین‌لغزش در سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۹ مورد تأیید قرار گرفت.Gigovic et al (۲۰۱۹)، در مطالعه‌ای با استفاده از تصمیم‌گیری چند معیاره فضایی و با استفاده از پانزده معیار، به پهنه‌بندی زمین‌لغزش در بخش غربی جمهوری صربستان پرداختند و در این مطالعه، در مجموع ۱۰۸۲ مکان لغزش شناسایی شدند. نتایج اعتبارسنجی تأیید کرد که ترکیب خطی وزنی (WLC)، از دقت بسیار بالایی برخوردار است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

شهرستان خلخال با وسعت ۲۶۸۸ کیلومتر مربع، در جنوب استان اردبیل، بین ۴۸ درجه و ۱۰ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۵۵ دقیقه طول شرقی و ۳۷ درجه و ۱۱ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۵۱ دقیقه عرض شمالی واقع شده است (شکل ۱). این شهرستان از ۳ شهر خلخال، هشتجین و کلور و سه بخش مرکزی، خورش رستم و شاهرود تشکیل شده است. شهرستان خلخال، از طرف شمال با شهرستان کوثر، از شرق با استان گیلان، از جنوب با استان زنجان و از غرب با شهرستان میانهٔ آذربایجان شرقی هم مرز است. این شهرستان، یک منطقه کوهستانی می‌باشد که از شرق به غرب و از شمال به جنوب از ارتفاعات آن کاسته می‌شود. ارتفاع بلندترین نقطه آن ۳۳۰۰ متر (قله آق داغ) و پست‌ترین نقطه ۵۲۰ متر (در حاشیه رودخانه قزل‌اوزن) است. در شهرستان خلخال، رود قزل اوزن و شاخه‌های آن مانند شاهرود، هروچای، آرپاچای جریان دارد و میانگین بارش سالانه این شهرستان، ۳۰۰ میلی‌متر می‌باشد.



شکل ۱- نقشه موقعیت شهرستان خلخال

۲-۲- داده‌ها

در این مطالعه، ابتدا عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش (شـامل: شـیب، جهت شـیب، لیتولوژی، کاربری اراضی، خاک، بارش، فاصـله از راه ارتباطی، فاصله از رودخانه و فاصله از گسل)، با توجه به شرایط طبیعی و انسانی منطقه شناسایی گردید. در مرحله بعد لایه‌های اطلاعاتی مربوط به هر یک از عوامل، در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی تهیه گردید. لایه‌های اطلاعاتی خطوط منحنی میزان، راه‌های ارتباطی و شـبکه آبراهه با رقومی‌سـازی از روی نقشـه توپوگرافی شـهرسـتان با مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ به دسـت آمد و لایه‌های شـیب و جهت شیب با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی تهیه گردید. لایه‌های اطلاعاتی مربوط به لیتولوژی (مقاومت سـنگ‌ها) و گسل با رقومی‌سازی از روی نقشه زمین‌شناسی شهرستان با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ تهیه شد. به منظور تهیه لایه اطلاعاتی کاربری از نقشه کاربری شهرستان با مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ استفاده شد و به منظور به روز کردن نقشه کاربری، از تصاویر لندست هشت که شامل سنجنده OLI و TIRS اسـتفاده شـده اسـت و بدین منظور در نرم افزار ENVI 5.3، بعد از انجام تصـحیحات اتمسـفری تصویر ماهواره‌ای با اسـتفاده از روش Flaash، از طریق روش طبقه‌بندی نظارت شدهٔ Maximum Likelihood، نسبت به تهیهٔ نقشه کاربری اقدام شد. جهت تهیه نقشه خاک نیز از نقشه خاک استان اردبیل با مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ استفاده شده است. نقشه بارش شهرستان، با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی و باران‌سنجی و با به دست آوردن معادله گرادیان بارش ($P= 0.239 H-73.48$) و نیز استفاده از مدل رقومی ارتفاعی تهیه گردید.

۲-۳- فرآیند تحلیل شبکه‌ای [1]

روش ANP شـکل توسـعه یافته‌ای از روشAHP اسـت که قادر اسـت همبستگی و بازخوردهای موجود بین عناصر در یک تصمیم‌گیری را مدل‌سازی نموده و تمامی تأثیرات درونی اجزای مؤثر در تصمیم‌گیری را منظور و وارد محاسبات نماید (رزمی، ۱۳۸۷؛ به نقل از مهدی زاده، ۱۳۹۰). به‌طور کلی، روش ANP دارای مراحل زیر می‌باشد.

۱- تعیین معیارها و شـــاخص‌ها. ۲- تعیین روابط و ارتباطات بین عناصـــر و خوشـــه‌ها: در این گام، مســـئلهٔ تصمیم‌گیری به ساختار شبکه‌ای تجزیه می‌گردد. هر شبکه از مجموعه‌ای از خوشه‌ها تشکیل شده است که هر خوشه شـامل مجموعه‌ای از عناصـر می‌باشد، به‌طورکلی، دو نوع وابستگی اصلی در هر شبکه می‌تواند وجود داشته باشد: الف- وابسـتگی میان خوشـه‌ها: به گونه‌ای که هر خوشـه می‌تواند با خوشهٔ دیگر در هر سطح تصمیم‌گیری دارای ارتباط متقابل و بازخوردی باشد. ب- وابستگی میان عناصر خوشه‌ها: به گونه‌ای که هر عنصر در هر خوشه می‌تواند با تمامی عناصر موجود در دیگر خوشه‌ها وابستگی داخلی داشته باشد و حتی عناصر درون یک خوشه نیز می‌توانند با یک‌دیگر وابستگی داشته باشند. ۳- مقایسات زوجی بین عناصر و خوشه‌ها: ماتریس‌های مقایسات زوجی مشابه با روش AHP می‌باشد و زوج‌های عناصر تصمیم‌گیری در هر خوشه به نسبت اهمیت‌شان در جهت شرط‌های کنترلی آن‌ها مقایســه می‌شــوند، خود خوشــه‌ها نیز به نسـبت سـهم‌شـان در هدف، مقایسـات زوجی می‌شـوند، به علاوه وابستگی‌های درونی بین عناصر یک خوشه نیز باید طوری جفتی مورد آزمون قرار گیرند و تأثیر هر عنصر بر روی عنصر دیگر توسط یک بردار ویژه نمایش داده شود، ٤- تشکیل سوپرماتریس‌ها: الف- تشکیل سوپرماتریس اولیه یا غیر وزنی: عناصر ANP با یکدیگر در تعامل قراردارند، این عناصر می‌توانند واحد تصمیم‌گیرنده، معیارها، زیرمعیارها، نتایج حاصـل، گزینه‌ها و هر چیز دیگری باشـند. وزن نسـبی هر ماتریس براساس مقایسهٔ زوجی شبیه روش AHP محاسبه می‌شود، وزن‌های حاصل در سوپرماتریس وارد می‌شوند که رابطهٔ متقابل بین عناصر سیستم را نشان می‌دهند. ب- تشکیل سوپرماتریس وزنی: در واقع ستون‌های سوپرماتریس از چند بردار ویژه تشکیل می‌شود که جمع هر کدام از بردارها برابر یک اسـت، بنابراین این امکان وجود دارد که جمع هر سـتون سـوپرماتریس اولیه بیش از یک باشد (متناسـب با بردارهای ویژه‌ای که در هر ستون وجود دارند). برای آن که از عناصر ستون متناسب با وزن نسبی‌شان فاکتور گرفته شـود و جمع ستون برابر یک شود، هر ستون ماتریس استاندارد می‌شود، در نتیجه ماتریس جدیدی به دسـت می‌آید که جمع هر یک از سـتون‌های آن برابر یک خواهد بود، این موضوع شبیه زنجیرهٔ مارکوف است که جمع احتمال همهٔ وضعیت‌ها معادل است، ماتریس جدید، ماتریس وزنی یا ماتریس استوکاستیک گفته می‌شود. ج- تشـکیل سـوپرماتریس حدی: سـوپرماتریس وزنی، به توان حدّی می‌رسـد تا عناصر ماتریس همگرا شده و مقادیر سـطری آن با هم برابر شـوند. ماتریسـی که در نتیجهٔ به توان رسیدن ماتریس وزنی به دست می‌آید، ماتریس حدّی

---

1 ANP

می‌باشد. ۵- نتایج ماتریس خوشه‌ها: پس از محاسبهٔ سوپرماتریس حدّی، آخرین مرحله برای تعیین ارزش و ضریب نهایی عناصر، محاسبهٔ نتایج ماتریس خوشه‌ها و نرمال سازی ضریب عناصر در سوپرماتریس حدی توسط ضریب خوشه‌ها می‌باشد. ٦- نتیجهٔ نهایی عناصر: ضرایب سوپرماتریس در ضرایب ماتریس خوشه‌ها نرمال شده و در نهایت، نتیجهٔ نهایی عناصر و اولویت آن‌ها مشخص می‌گردد (فرجی سبک‌بار و همکاران، ۱۳۸۹).

۲-٤- ترکیب خطی وزنی [1]

هر لایه نقشه معیار استاندارد می‌شود. ۲- وزن‌های معیار تعیین می‌گردد. ۳- لایه‌های نقشه استاندارد شده وزنی را ایجاد می‌کنیم (ضرب لایه‌های نقشه استاندارد شده در وزن‌های متناظر). ٤- با اعمال عملیات همپوشی جمعی بر روی لایه‌های نقشه استاندارد شده وزنی، نمره یا امتیاز کل را در رابطه با هر گزینه به دست می‌آوریم؛ گزینه‌ای که دارای بالاترین امتیاز(رتبه) باشد، به عنوان بهترین گزینه شناخته می‌شود .به‌طور رسمی در قاعده تصمیم‌گیری برای ارزیابی هر گزینه یا A_i، از رابطه (۱) استفاده می‌شود:

$$A_i = \sum_j w_j x_{ij}$$ رابطه ۱

که در آن x_{ij}، معرف نمره گزینه i ام درارتباط با صفت j ام و w_j، مشتمل بر یک وزن استاندارد شده است؛ به گونه‌ای که $\sum w_j = 1$. وزن‌ها اهمیت نسبی هر صفت را به نمایش می‌گذارند. با تعیین ارزش حداکثر=A_i، اولویت‌دارترین گزینه انتخاب می‌گردد. در رابطه (۱) به مانند معادل رگرسیون تناسب به صورت خطی تعیین می‌شود (مالچفسکی، ۱۳۸۵).

۲-۵- تحلیل لکه داغ [2]

تحلیل لکه‌های داغ، آماره گتیس-ارد اردجی را برای کلیه عوارض موجود محاسبه می‌نماید. امتیاز Z محاسبه شده نشان می‌دهد که کجای داده‌ها مقادیر کم و زیاد خوشه‌بندی شده‌اند. این ابزار در حقیقت به هر عارضه در چهارچوب عوارضی که در همسایگی‌اش قرار دارند نگاه می‌کند. اگر عارضه‌ای مقادیر بالا داشته باشد جالب و مهم است، ولی به تنهایی ممکن است یک لکه داغ معنادار از نظر آماری نباشد. برای اینکه یک عارضه لکه داغ تلقی شود و از نظر آماری معنادار نیز باشد باید هم خودش و هم عوارضی که در همسایگی‌اش قرار دارند، دارای مقادیر بالا باشند. جمع محلی یک عارضه و همسایگانش به‌طور نسبی با جمع کل عارضه‌ها مقایسه می‌شود. زمانی که جمع

1 WLC
2 Hot Spot

محلی به‌طور زیاد و غیر منتظره‌ای از جمع محلی مورد انتظار بیشتر باشد و اختلاف به اندازه‌ای باشد که نتوان آن را در نتیجه تصادف دانست، در نتیجه امتیاز Z به دست خواهد آمد (روستایی و همکاران، ۱۳۹۵). آماره گیتس - ارد جی، به صورت زیر (رابطه ۲)، محاسبه می‌شود (Mitchell, 2008).

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^{n} w_{i,j} x_j - \bar{x} \sum_{j=1}^{n} w_{i,j}}{s\sqrt{\frac{\left[n \sum_{j=1}^{n} w_{i,j}^2 - \left(\sum_{j=1}^{n} w_{i,j}\right)^2\right]}{n-1}}}$$ رابطه ۲

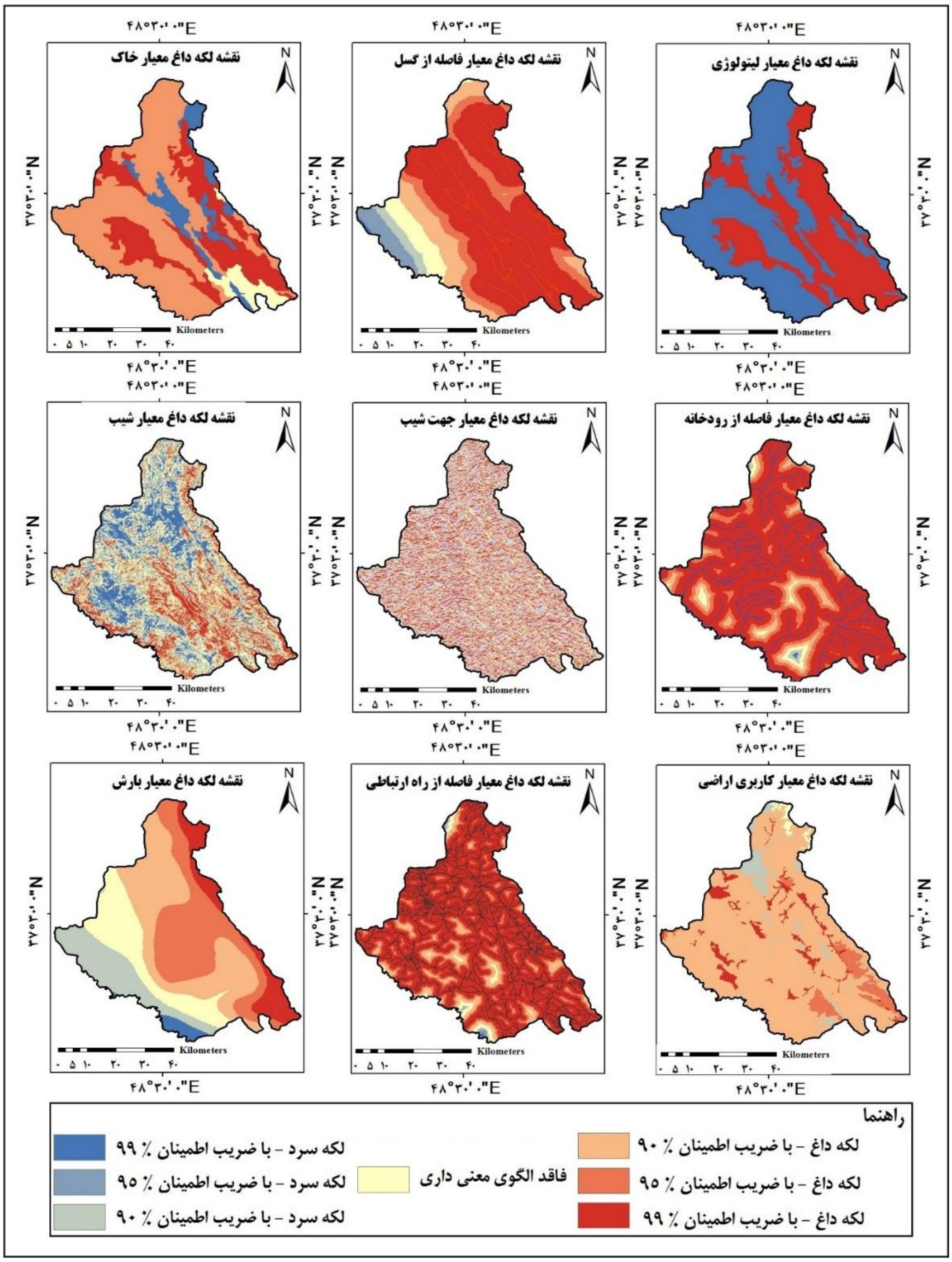
در این فرمول Xj مقدار خصیصه برای عارضه، Wij وزن فضایی بین عارضه i, j و n برابر با تعداد کل عارضه‌ها است. برای محاسبه s از رابطه (۳)، استفاده می‌شود.

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} x_j^2}{n} - (\bar{x})^2}$$ رابطه ۳

در واقع، آماره G عمومی، شاخص خودهمبستگی فضایی است. ضریب G عمومی بیشتر، نقطه داغ را نشان می‌دهد و ضریب Gi کمتر، نقاط سرد تشخیص داده می‌شود. آماره Gi که برای هر عارضه موجود در داده‌ها محاسبه می‌شود، نوعی نمره Z است. با توجه به امتیاز Z محاسبه شده می‌توان نشان داد که در کدام بلوک‌ها داده‌ها با مقادیر زیاد یا کم خوشه‌بندی شده‌اند. برای آن دسته از نمرات Z که مثبت و از نظر آماری معنی دار هستند، هر چه امتیاز Z بزرگ‌تر باشد مقادیر بالا به میزان زیادی خوشه‌بندی شده و لکه داغ را تشکیل می‌دهد. برای آن دسته از نمرات Z که منفی و از نظر آماری معنادار هستند، هر چقدر نمره Z کوچک‌تر باشد، به معنی خوشه‌بندی شدیدتر مقادیر پایین بوده و این‌ها در حقیقت لکه حرارتی سرد را نشان می‌دهد.با توجه به این که G_i خود نوعی نمرهٔ z محسوب می‌شود، از محاسبهٔ دوباره z پرهیز شده است.

۳- نتایج

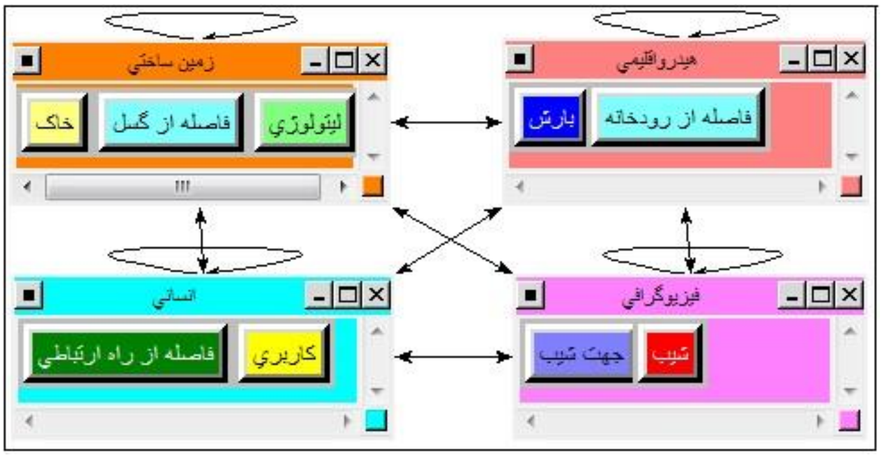
جهت دستیابی به الگوی پهنه‌بندی مکانی زمین‌لغزش در شهرستان خلخال، ضریب G برای کلیه معیارها از طریق نرم افزار GIS10.5، از روش صفر و یک و روش مرز مشترک محاسبه شده است. شکل ۲، تحلیل لکه‌های داغ را بر روی معیارها نشان می‌دهد که در این نقشه‌ها، لکه‌های قرمزرنگی که مشاهده می‌شود، نشانگر مقادیر بزرگ‌تر Gi هستند که به عنوان لکه‌های داغ شناخته می‌شوند و این محدوده‌ها از لحاظ پتانسیل زمین لغزش پرخطر هستند. هر میزان که Gi کاسته شود و Z نیز مقدار منفی و کوچک‌تر به خود بگیرد. به طرف لکه‌های سرد نزدیک می‌شویم که در نقشه‌ها با رنگ آبی نشان داده شده‌اند و این محدوده‌ها در نقاط کم خطر قرار دارند.



شکل ۲- نقشه‌های لکه داغ معیارهای مطرح در پهنه‌بندی زمین‌لغزش شهرستان خلخال

در مرحله بعد، نسبت به وزن‌دهی با روش ANP اقدام گردید. شکل (۳) نمونهٔ مدل را جهت پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در شهرستان خلخال، در نرم‌افزار Super Decisions نشان می‌دهد. در مطالعه حاضر عوامل زمین

ساختی، انسانی، فیزیوگرافی و هیدرو اقلیمی خوشه‌ها می‌باشند و معیارهای لیتولوژی، خاک، کاربری اراضی، شیب، فاصلـه از شبکه آبراهه، فاصله از گسل و بارندگی عناصر مطالعه می‌باشند و سپس مشابه با روش AHP، زوج‌های عناصر تصمیم‌گیری در هر خوشه به نسبت اهمیت‌شان در جهت شرط‌های کنترلی آن‌ها مقایسه شده و خود خوشه‌ها نیز به نسبت سهم‌شان در هدف، مقایسات زوجی شدند و سوپرماتریس‌ها ایجاد شدند (جداول ۱ تا ٤) و نتیجهٔ نهایی عناصر با ضرایب سوپرماتریس در ضرایب ماتریس خوشه‌ها نرمال شده و در نهایت، نتیجهٔ نهایی عناصر و اولویت آن‌ها مشخص می‌گردید (جدول ٥).



شکل ۳- نمای کلی از خوشه‌ها و عناصر برای بررسی پتانسیل زمین‌لغزش

جدول ۱- سوپرماتریس غیروزنی یا اولیهٔ مربوط به مدل

خوشه‌ها و عناصر		انسانی		زمین ساختی			فیزیوگرافی		هیدرواقلیمی	
		فاصله از راه	کاربری اراضی	فاصله از گسل	خاک	لیتولوژی	جهت شیب	شیب	فاصله از رودخانه	بارندگی
انسانی	فاصله از راه	۰/۰۹۹	۱	۰/۵۰۰	۰/۰۹۹	۰/۳۳۳	۰	۰/۳۳۳	۰	۰/۳۳۳
	کاربری اراضی	۰/۹۰۰	۰	۰/۵۰۰	۰/۹۰۰	۰/۶۶۶	۰	۰/۶۶۶	۰	۰/۶۶۶
زمین ساختی	فاصله از گسل	۰/۳۷۹	۰/۳۲۲	۰	۰/۲٤۹	۰/۳۳۳	۰	۰/۳۳۳	۰	۰/٤۰۰
	خاک	۰/۲۸۹	۰/٥٦٦	۰/۱٤۲	۰	۰/۶۶۶	۱	۰/۳۳۳	۰	۰/۲۰۰
	لیتولوژی	۰/۳۳۱	۰/۱۱۰	۰/۸٥۷	۰/۷٥۰	۰	۰	۰/۳۳۳	۰	۰/٤۰۰
فیزیوگرافی	جهت شیب	۰	۰	۰/۲٤۹	۰	۰/۳۳۳	۰	۱	۱	۰/۲۰۰
	شیب	۱	۱	۰/۷٥۰	۱	۰/۶۶۶	۱	۰	۰	۰/۸۰۰
هیدرواقلیمی	فاصله از رودخانه	۰	۰/۲۰۰	۰/۸۰۰	۰	۰/۲٤۹	۰	۰/٥۰۰	۰	۱
	بارندگی	۱	۰/۸۰۰	۰/۲۰۰	۱	۰/۷٥۰	۰	۰/٥۰۰	۱	۰

جدول ۲- سوپرماتریس وزنی مربوط به مدل

خوشه‌ها و عناصر		انسانی		زمین ساختی			فیزیوگرافی		هیدرواقلیمی	
		فاصله از راه	کاربری اراضی	فاصله از گسل	خاک	لیتولوژی	جهت شیب	شیب	فاصله از رودخانه	بارندگی
انسانی	فاصله از راه	۰/۰۱۴	۰/۱۴۲	۰/۰۵۳	۰/۰۱۰	۰/۰۳۵	۰	۰/۰۴۸	۰	۰/۰۲۰
	کاربری اراضی	۰/۱۲۸	۰	۰/۰۵۳	۰/۰۹۶	۰/۰۷۱	۰	۰/۰۹۷	۰	۰/۰۴۰
زمین ساختی	فاصله از گسل	۰/۰۷۶	۰/۰۶۴	۰	۰/۱۶۹	۰/۲۲۶	۰	۰/۱۹۷	۰	۰/۰۵۵
	خاک	۰/۰۵۸	۰/۱۱۳	۰/۰۹۶	۰	۰/۴۵۲	۰/۷۵۷	۰/۱۹۷	۰	۰/۰۲۷
	لیتولوژی	۰/۰۶۶	۰/۰۲۲	۰/۵۸۱	۰/۵۰۸	۰	۰	۰/۱۹۷	۰	۰/۰۵۵
فیزیوگرافی	جهت شیب	۰	۰	۰/۰۳۹	۰	۰/۰۵۲	۰	۰/۱۸۹	۰/۶۲۴	۰/۱۰۰
	شیب	۰/۳۴۲	۰/۳۴۲	۰/۱۱۷	۰/۱۵۶	۰/۱۰۴	۰/۲۴۲	۰	۰	۰/۴۰۰
هیدرواقلیمی	فاصله از رودخانه	۰	۰/۰۶۲	۰/۰۴۶	۰	۰/۰۱۴	۰	۰/۰۳۶	۰	۰/۳۰۱
	بارندگی	۰/۳۱۳	۰/۲۵۰	۰/۰۱۱	۰/۰۵۸	۰/۰۴۳	۰	۰/۰۳۶	۰/۳۷۵	۰

جدول ۳- سوپرماتریس حدی مربوط به مدل

خوشه‌ها و عناصر		انسانی		زمین ساختی			فیزیوگرافی		هیدرواقلیمی	
		فاصله از راه	کاربری اراضی	فاصله از گسل	خاک	لیتولوژی	جهت شیب	شیب	فاصله از رودخانه	بارندگی
انسانی	فاصله از راه	۰/۰۳۵	۰/۰۳۵	۰/۰۳۵	۰/۰۳۵	۰/۰۳۵	۰/۰۳۵	۰/۰۳۵	۰/۰۳۵	۰/۰۳۵
	کاربری اراضی	۰/۰۶۵	۰/۰۶۵	۰/۰۶۵	۰/۰۶۵	۰/۰۶۵	۰/۰۶۵	۰/۰۶۵	۰/۰۶۵	۰/۰۶۵
زمین ساختی	فاصله از گسل	۰/۱۲۶	۰/۱۲۶	۰/۱۲۶	۰/۱۲۶	۰/۱۲۶	۰/۱۲۶	۰/۱۲۶	۰/۱۲۶	۰/۱۲۶
	خاک	۰/۲۱۱	۰/۲۱۱	۰/۲۱۱	۰/۲۱۱	۰/۲۱۱	۰/۲۱۱	۰/۲۱۱	۰/۲۱۱	۰/۲۱۱
	لیتولوژی	۰/۲۱۸	۰/۲۱۸	۰/۲۱۸	۰/۲۱۸	۰/۲۱۸	۰/۲۱۸	۰/۲۱۸	۰/۲۱۸	۰/۲۱۸
فیزیوگرافی	جهت شیب	۰/۰۷۷	۰/۰۷۷	۰/۰۷۷	۰/۰۷۷	۰/۰۷۷	۰/۰۷۷	۰/۰۷۷	۰/۰۷۷	۰/۰۷۷
	شیب	۰/۱۵۲	۰/۱۵۲	۰/۱۵۲	۰/۱۵۲	۰/۱۵۲	۰/۱۵۲	۰/۱۵۲	۰/۱۵۲	۰/۱۵۲
هیدرواقلیمی	فاصله از رودخانه	۰/۰۴۰	۰/۰۴۰	۰/۰۴۰	۰/۰۴۰	۰/۰۴۰	۰/۰۴۰	۰/۰۴۰	۰/۰۴۰	۰/۰۴۰
	بارندگی	۰/۰۷۱	۰/۰۷۱	۰/۰۷۱	۰/۰۷۱	۰/۰۷۱	۰/۰۷۱	۰/۰۷۱	۰/۰۷۱	۰/۰۷۱

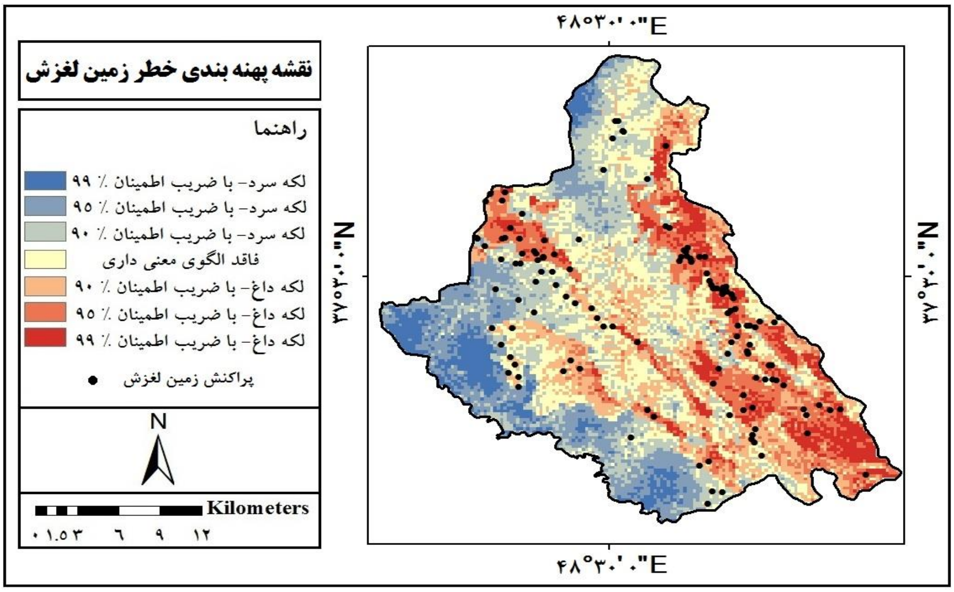
جدول ٤- ماتریس اوزان گروه‌ها

خوشه‌ها	انسانی	زمین ساختی	فیزیوگرافی	هیدرو اقلیمی
انسانی	۹/۱۴۲	۰/۱۰۶	۰/۱۴۶	۰/۰۶۰
زمین ساختی	۰/۲۰۰	۰/۶۷۸	۰/۵۹۱	۰/۱۳۷
فیزیوگرافی	۰/۳۴۲	۰/۱۵۶	۰/۱۸۹	۰/۵۰۰
هیدرو اقلیمی	۰/۳۱۳	۰/۰۵۸	۰/۰۷۲	۰/۳۰۱

جدول ٥- وزن نهایی حاصل از روش ANP

معیار	فاصله از راه	کاربری	فاصله از گسل	خاک	لیتولوژی	جهت شیب	شیب	فاصله از رودخانه	بارندگی
وزن نهایی	٠/٣٥٣	٠/٦٤٦	٠/٢٢٦	٠/٣٧٩	٠/٣٩٣	٠/٣٣٦	٠/٦٦٣	٠/٣٦٠	٠/٦٣٩

پس از انجام تحلیل لکه‌های داغ برای هر شاخص و استخراج نقشه‌های هر یک از معیارها و اعمال کردن وزن‌های مربوطۀ حاصل از روش ANP، نقشه‌های حاصله وارد مدل WLC شده و با اعمال مراحل مختلف مدل بر روی نقشه‌ها، خروجی نهایی بدست آمد. سپس بر روی لایه نهایی بدست آمده نیز، تحلیل لکه داغ انجام شد و نقشه نهایی پهنه‌بندی لغزش در ٧ طبقه از (بسیار داغ) بسیار پرخطر تا (بسیار سرد) بسیار کم خطر، بدست آمد (شکل ٤). اطلاعات مربوط به هر یک از طبقات خطر نیز در جدول ٦، نشان داده شده است.



شکل ٤- نقشه پهنه‌بندی خطر زمین لغزش شهرستان خلخال

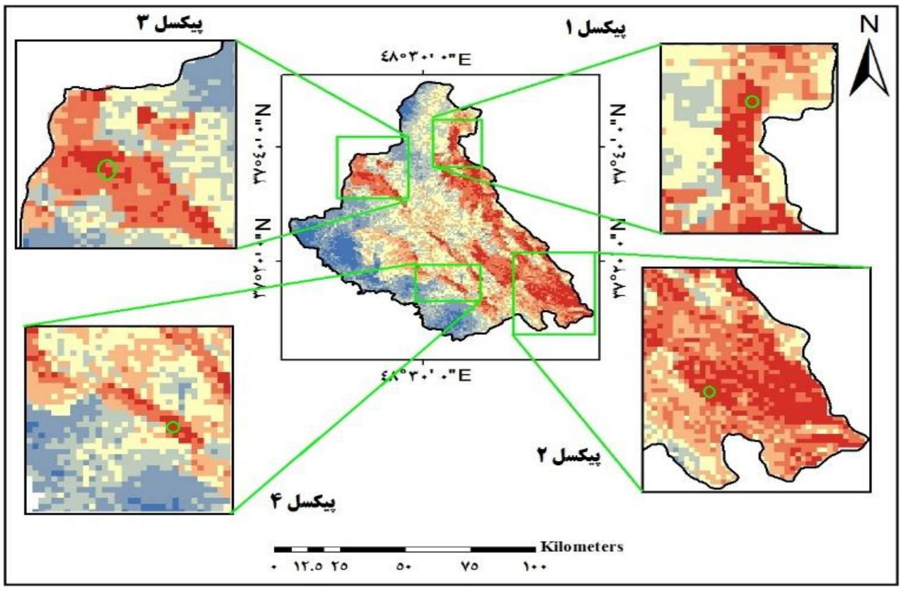
جدول ٦- درصد مساحت تحت پوشش الگوی حاصل از شاخص GI یا Hot Spot

طبقه خطر	لکه سرد- ٩٩٪	لکه سرد- ٩٥٪	لکه سرد- ٩٠٪	فاقد الگوی معناداری	لکه داغ- ٩٠٪	لکه داغ- ٩٥٪	لکه داغ- ٩٩٪
مساحت به کیلومتر مربع	١٩٠/٩٨	٣٧٠/٨٠	٤٩٥/٨٦	٥٦٨/٨١	٤٢٧/١٤	٣٨٥/٠٨	٢٤٩/٣٣
مساحت به درصد	٧/١٠	١٣/٧٩	١٨/٤٥	٢١/١٦	١٥/٨٩	١٤/٣٣	٩/٢٨

٤- بحث

نتایج تحلیل از ضریب G عمومی، شکل‌گیری نقاط داغ (به ترتیب ۲٤۹/۳۳، ۳۸۵/۰۸ و ٤۲۷/١٤، کیلومتر مربع از مساحت محدوده، در طبقات لکه داغ، با ضریب اطمینان ۹۹، ۹۵ و ۹۰ درصد) و نقاط سرد (به ترتیب ۱۹۰/۹۸، ۳۷۰/۸۰ و ٤۹۵/۸٦، کیلومتر مربع از مساحت محدوده، در طبقات لکه سرد، با ضریب اطمینان ۹۹، ۹۵ و ۹۰ درصد) را نشان می‌دهند و همچنین، ٥٦۸/۸۱ کیلومتر مربع از مساحت حوضه، فاقد الگوی معنی‌داری می‌باشند. جهت مستندسازی بیشتر اعتبار نقشه‌های پهنه‌بندی پتانسیل لغزش با استفاده از تلفیق روش‌های ANP ،Hot Spot و WlC در این قسمت سعی گردیده است، بعد از انتخاب تصادفی تعدادی از پیکسل‌های معرفی شده به عنوان نقاط پرخطر شکل (٥)، به بررسی مورد به مورد ویژگی‌های این پیکسل‌ها به لحاظ معیارهای تعیین شده پرداخته شود. به‌طور قطع انطباق این نمرات استاندارد شده با ارزش‌های واقعی ثبت شده از معیارها که با توجه به نقشه‌های رقومی به دست آمده است، به درک ملموس‌تر نتیجه حاصل کمک قابل توجهی می‌کند. با توجه به جدول مربوط به بررسی پیکسل‌های پرخطر (جدول۷)، مناطق با لکه داغ ۹۹ درصد، به‌طور عمده در شیب ۲۰ تا ۳۵ درصد قرار دارند و در این مقدار شیب، مواد سطحی و اصولاً ریزدانه که مستعد برای لغزش‌اند با جذب آب و افزایش رطوبت به حد سیلانی رسیده و با بالا رفتن تنش‌های برشی و گسیختگی مواد در دامنه، شروع به حرکت می‌کنند. همچنین می‌توان گفت مناطق پرخطر، در مناطق با بارش زیاد (٦٥٠-٤٠٠ میلی‌متر)، قرار دارند و لغزش‌های شهرستان، در پی بارش‌های سنگین و یا به دنبال ذوب برف‌ها در فصل بهار و در سازندهای مستعد (ریزدانه و سست) شکل می‌گیرند و نحوه فعالیت بدین گونه می‌باشد که آب در داخل دامنه‌هایی که از خاک‌های ریزدانه با درصد زیادی از رس، مارن و سیلت تشکیل شده‌اند و از عمق زیادی نیز برخوردارند، نفوذ می‌یابد و فشار آب منفذی خاک و تنش‌های برشی افزایش می‌یابد. لذا، با به هم خوردن حالت کلوئیدی و چسبندگی خاک، پایداری واحدهای مستعد کاهش یافته و موجب گسیختگی می‌گردد. بررسی عامل لیتولوژی نیز نشان می‌دهد، سازندهای نامقاوم و نیمه‌مقاوم، که عمدتاً سازندهای سست کواترنری هستند، دارای حساسیت بالایی نسبت به وقوع لغزش‌اند. همچنین نقاط لکه داغ به‌طور عمده در خاک‌هایی با درصد زیاد رس و سیلت و مارن و در دامنه‌های شمالی و شمال غربی (به دلیل دریافت بارش زیاد، ماندگاری طولانی مدت برف و داشتن رطوبت بیشتر)، قرار دارند. بررسی معیار کاربری اراضی نیز حاکی از این موضوع است که کاربری زراعی بیشترین درصد از مساحت مناطق پرخطر را به خود اختصاص داده است که با توجه به عدم رعایت تناوب زارعی، کشت در اراضی شیب‌دار و افزایش رطوبت خاک از طریق آبیاری و نفوذ دادن آب بیشتر به زمین قابل قبول می‌باشد. به علاوه اراضی پرخطر (لکه داغ)، معرفی شده حاصل از روش تحقیق، نشان می‌دهد که اراضی پرخطر به‌طور نسبی، در فواصل نزدیک از جاده، رودخانه و گسل قرار دارند. در این رابطه می‌توان گفت، عامل جاده، به دلیل زیربری و از بین بردن پاشنه دامنه و تغییر در شیب دامنه‌ها در ایجاد حرکات لغزشی نقش

بســیار مهمی دارد و رودخانه‌ها نیز، با زیرشــویی دامنه‌ها و از بین بردن تکیه‌گاه مواد دامنه‌ای در ایجاد زمین لغزش دارای اهمیت‌اند و همچنین، گســل‌ها منجر به گســیختگی در دامنه‌ها و ایجاد شــکســتگی در لایه‌ها و خردشــدگی توده‌های سنگی و در نتیجه نفوذ آب به داخل زمین و کاهش مقاومت برشی دامنه می‌گردند.



شکل ۵- نقشه پیکسل‌های نمونهٔ پرخطر مورد بررسی در پهنه‌بندی زمین لغزش

جدول ۷- ارزش‌های عادی و فازی نمونه‌های مورد بررسی از پیکسل‌های پرخطر در پهنه‌بندی زمین‌لغزش

معیار	پیکسل نمونه ۱	پیکسل نمونه ۲	پیکسل نمونه ۳	پیکسل نمونه ٤
	ارزش عادی	ارزش عادی	ارزش عادی	ارزش عادی
خاک	لیتوسول	لیتوسول	لیتوسول	لیتوسول
لیتولوژی	نامقاوم	نامقاوم	مقاوم	نیمه‌مقاوم
فاصله از گسل به متر	۹۰۰	۱۲۰۰	۱۸۰۰	۲۰۰
کاربری اراضی	ترکیب زراعی و باغ	مرتع	زراعت دیم	زراعت دیم
فاصله از جاده به متر	۱۰۰۰	۸۰۰	۳۰۰	٦۰۰
شیب به درصد	۳۰	۲۲	۳٤	۲۵
جهت شیب	شمال	شمال‌غرب	شمال	شمال
بارندگی به میلی‌متر	٦۲۰	۵۸۰	٤۱۰	٤٦۰
فاصله از رودخانه به متر	۱۰۰۰	۵۰۰	٤۰۰	٦۰

همچنین، نتایج حاصل از همپوشانی خروجی حاصل از مطالعه، با پراکنش زمین‌لغزش‌ها (شکل ٤)، نشان داد که ۷٤/۸۰ از نقاط پراکنش لغزش‌ها در سطح شهرستان خلخال، در طبقات پرخطر (لکه داغ ۹۹ درصد تا ۹۰ درصد) و ۹/۹۳ از نقاط پراکنش لغزشی، در طبقات با خطر کم (لکه سرد ۹۹ درصد تا ۹۰ درصد) قرار دارند و طبقهٔ فاقد الگوی معناداری ۱۵/۲۷ درصد از نقاط پراکنش لغزشی را به خود اختصاص داده است؛ لذا نقشهٔ پهنه‌بندی حاصل از تلفیق روش‌های Hot Spot، ANP و WlC، با نقاط پراکنش لغزشـی، هم‌خوانی بالایی دارد؛ به عبارت دیگر، نقاط پرخطر منطبق بر پراکنش و مکان‌های مربوط به رخداد واقعی زمین لغزش اسـت. نمونه‌هایی از زمین‌لغزش‌ها در سـطح شهرستان خلخال، در شکل ٦، نمایش داده شده است.



شکل ٦- نمونه‌هایی از زمین‌لغزش‌ها در سطح شهرستان خلخال

٥- نتیجه‌گیری

در شـهرستان خلخال به دلیل کوهستانی بودن، وجود خاک‌های عمیق بر روی دامنه‌های پرشیب و نفوذ آب به لایه‌های زیرین خاک در هنگام ذوب تدریجی برف‌ها، زمینهٔ مناسبی برای شکل‌گیری پدیدهٔ زمین‌لغزش به وجود آمده و خسارات زیادی را به دنبال داشته است. در این پژوهش خطر زمین‌لغزش در شهرستان خلخال، با استفاده از تلفیق روش‌های Hot Spot، ANP و WlC، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج مطالعه نشان داد، عوامل شیب، کاربری اراضی، بارش و لیتولوژی به ترتیب با مقدار ۰/٦٦۳، ۰/٦٤٦، ۰/٦۳۹ و ۰/۳۷۹ بیش‌ترین ضریب وزنی را به خود اختصاص دادند و همچنین نتایج حاصل از مطالعه بیانگر این امر می‌باشدکه به ترتیب ۹/۲۸، ١٤/۳۳ و ۱۵/۸۹ درصد از محدوده مطالعاتی در طبقات با تحلیل لکه داغ ۹۹، ۹۵ و ۹۰ درصـد، قرار دارد. با توجه به نقشـه پهنه‌بندی لغزش شهرستان خلخال، مناطق پرخطر، به‌طور عمده در شـیب ۲۰ تا ۳۵ درصد، در مناطق با بارش زیاد (٦۵۰-٤۰۰ میلی‌متر)، قرار دارند. همچنین، سـازندهای نامقاوم و نیمه‌مقاوم، که عمدتاً سازندهای سست کواترنری هستند، خاک‌هایی با درصد زیاد رس و سـیلت و مارن، کاربری‌های زراعی و دامنه‌های شمالی و شمال غربی، دارای حساسیت بالایی نسبت به وقوع لغزش‌اند. به علاوه نتایج مطالعه، نشـان می‌دهد که اراضـی پرخطر به‌طور نسـبی، در فواصل نزدیک از جاده، رودخانه و گسل قرار دارند.

همچنین می‌توان گفت که نتایج حاصـل از این مطالعه، حاکی از توان بالای شـهرستان از لحاظ رخداد حرکات لغزشی می‌باشد، لذا اراضی بسیار پرخطر و پرخطر اراضی هستند که باید اقدامات حفاظتی و آبخیزداری در آن انجام گیرد. همچنین نباید تخریب و کارهای غیر اصـولی از قبیل تخریب پوشـش گیاهی در اثر تبدیل اراضـی مرتعی به زراعی، و کاهش کمی و کیفی پوشش گیاهی در اثر چرای بی‌رویه دام‌ها، کشت دیم در اراضی شیب‌دار، عدم رعایت تناوب زراعی و احداث غیر اصولی جاده انجام گیرد. بنابراین پیشنهاد می‌گردد، سازمان‌ها و ارگان‌های زیربط ازجمله ادارهٔ کل منابع طبیعی، ادارهٔ راه و ترابری، بنیاد مسکن، سازمان جهاد کشاورزی و سازمان آب منطقه‌ای و ... در طراحی پروژه‌ها، مدیریت‌های محیطی، اجرای برنامه‌ها، طرح‌های عمرانی و هرگونه ساخت و سازها و فعالیت‌های زیربنایی در شهرستان خلخال، به منظور انتخاب استراتژی صحیح و مناسب و دوری از مناطق خطرناک، نقشه‌های پهنه‌بندی زمین‌لغزش منطقه را نیز مد نظر قرار دهند.

همانگونه که می‌دانیم، هر یک از روش‌های پهنه‌بندی زمین‌لغزش‌ها به نوبه خود دارای مزایا و معایبی می‌باشند. این امر که یک روش در یک منطقه تا چه حد از کارایی برخوردار است به شرایط بسیاری ازجمله اقلیم و توپوگرافی و دیگر عوامل بستگی دارد. با توجه به نقشه‌های پهنه‌بندی حاصل از مطالعه، بررسی موردی پیکسل‌های اولویت‌دار معرفی شـده در خروجی حاصـل از روش تحقیق و مقایسـهٔ آن با نقشـه پراکنش حاصـل از پیمایش‌های میدانی و همچنین شـرایط اقلیمی، توپوگرافی، زمین‌شـناسـی، هیدرولوژی و انسانی حاکم بر منطقه می‌توان، نتیجه گرفت که استفاده تلفیق روش‌های Hot Spot، ANP و WlC، از دقت نسبی بالایی جهت مطالعهٔ زمین‌لغزش برخوردار است و انتظار می‌رود، این مطالعه و نتایج حاصـــل از این تحقیق، راه‌گشـــایی برای اعمال مدیریت بهتر و علمی‌تر مدیران و برنامه‌ریزان ذی‌صلاح در این زمینه گردد.

کتابنامه

احمدی، حسن؛ ۱۳۸٦. ژئومورفولوژی کاربردی. جلد اول. فرسایش آبی. چاپ پنجم. انتشارات دانشگاه تهران.

امیر احمدی، ابوالقاسـم؛ شـکاری بادی، علی؛ معتمدی‌راد، محمد؛ ۱۳۹٤. پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از مدل ANP (مطالعه موردی: حوضه پیوه‌ژن دامنه جنوبی بینالود). پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی. سال چهارم. شماره ۳، ۲۳۰-۲۱٤.

بهاروند، سـیامک؛ رهنماراد، جعفر؛ سـوری، سلمان؛ ۱۳۹۷. اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر زمین لغزش و پهنه‌بندی خطر آن با اسـتفاده از رو.ش ترکیب خطی وزن‌دار (مطالعه موردی: حوضه وارک). مخاطرات محیط طبیعی. دوره هفتم. شماره ۱٦. ۲۱۰-۱۹۵.

بهاروند، سیامک؛ سارویی، حمزه؛ سوری، سلمان؛ ۱۳۹٦. پهنه‌بندی خطر زمین لغزش با استفاده از روش ترکیب خطی وزن‌دار، مطالعه موردی: حوضه ده یقید. استان لرستان. فصلنامه جغرافیای طبیعی. سال دهم. شماره ۳۵، ۸٦-۷۵.

پیروزی، الناز؛ مددی، عقیل؛ غفاری گیلانده، عطا؛ ۱۳۹۲. پهنه‌بندی زمین لغزش با استفاده از روش ترکیب خطی وزنی در راستای حفاظت از محیط زیست (مطالعه موردی: حوضه آبخیز آق لاقان چای). هفتمین کنفرانس ملی روز جهانی محیط زیست. تهران.

رنجبر، محسن؛ روغنی، پریسا؛ ۱۳۸۸. پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در شهرستان اردل با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی AHP. فصل‌نامه جغرافیایی چشم‌انداز زاگرس. سال اول. شاره ۲، ۸۸-۲۲.

روستایی، شهریور؛ کریم‌زاده، حسین؛ زاد ولی، فاطمه؛ ۱۳۹۵. بررسی تحلیل فضایی گسترش فقرشهری در شهر تبریز طی سال‌های ۱۳۸۵-۱۳۷۵. مجله آمایش جغرافیایی فضا. سال ششم. شماره بیست و دوم، ۱۳۶-۱۲۵.

صمدزاده، رسول؛ ۱۳۹٤. ارزیابی پهنه‌های خطر زمین لغزش در جاده اردبیل-سرچم. پژوهش‌های دانش زمین. سال ششم. شماره ۲۳، ۳۳-۱۹.

فرجی سبک‌بار، حسنعلی؛ سلمانی، محمد؛ فریدونی، فاطمه؛ کریم‌زاده، حسین؛ رحیمی، حسن؛ ۱۳۸۹. مکان‌یابی محل دفن بهداشتی زبالهٔ روستایی با استفاده از مدل فرایند تحلیل شبکه‌ای (ANP) ؛ مطالعهٔ موردی: نواحی روستایی شهرستان قوچان. فصل‌نامه مدرس علوم انسانی. دوره ١٤. شماره ١. ١٤٩-١٢٧.

کردوانی، پرویز؛ غلامی کلاته، غلامرضا؛ رنجبر، محسن؛ ۱۳۹٦. ارزیابی خطر وقوع زمین‌لغزش در حوضه آبخیز اوغان استان گلستان با استفاده از فرایندد تحلیل شبکه (ANP). پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. جلد بیست و چهارم. شماره ششم. ٦٦-٤٧.

کریمی سنگ‌چینی، ابراهیم؛ اونق، مجید؛ سعدالدین، امیر؛ ۱۳۹۰. مقایسه کارایی ٤ مدل کمی ونیمه کیفی در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوضه آبخیز چهل‌چای استان گلستان. پژوهش‌های حفاطت آب و خاک. جلد نوزدهم. شماره اول. ۱۸۳-۱۹٦.

مالچفسکی، یاچک؛ ۱۳۸۵. ترجمه پرهیزگار، اکبر، عطا غفاری گیلانده. سامانه اطلاعات جغرافیایی و تحلیل تصمیم چند معیاری. چاپ اول. انتشارات سمت.

محمودی، فرج الله؛ ۱۳۸۷. ژئومورفولوژی دینامیک. چاپ دوم. انتشارات پیام نور.

مهدی زاده سولا، جواد؛ ۱۳۹۱. تحلیل مخاطرات اقلیمی در شهر تبریز با استفاده از منطق فازی و مدلANP . استاد راهنما: بهروز سبحانی. پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد رشتهٔ جغرافیا. دانشگاه محقق اردبیلی.

نصیری، شهرام؛ ۱۳۸۳. نگرشی بر زمین‌لغزش‌های ایران (مطالعه موردی ناپایداری شیب‌ها در جاده هراز. پایگاه ملی داده‌های علوم زمین کشور.

هدایی، علی‌اصغر؛ ۱۳۸۱. ناپایداری دامنه‌ای و پهنه‌بندی خطر رویداد حرکات دامنه‌ای. همایش علمی تحقیق مدیریت امداد و نجات. ٤٦١-٤٥٣.

Abedi Gheshlaghi H, Feizizadeh B. (2017). An integrated approach of analytical network process and fuzzy based spatial decision making systems applied to landslide risk mapping. Journal of African Earth Sciences 133: 15-24.

Alcantara I. (2002).Geomorphology, Natural Hazards, Vulnerability and Prevention of Natural Disaster in Developing Countries. Geomorphology 47:107-124.

Bell R, Glade T. (2004). Quantitative risk analysis for landslides,Examples from Bildudalur, NW-Iceland, Natural Hazards and Earth 4: 117-131.

Dhakal A, Amada T, Aniya M. (2000). Landslide Hazard Mapping and its Evaluation Using GIs: An Investigation of Sampling Schemes for a Grid-Cell Based Quantitative Method.

Gigovic L, Drobnjak S, Pamucar D. (2019). The Application of the Hybrid GIS Spatial Multi-Criteria Decision Analysis Best–Worst Methodology for Landslide Susceptibility Mapping. International jornal of Geo-Information 8 (79): 1-29.

Kouli M, Loupasakis C, Soupios P, Vallianatos F. (2010). Landslide hazard zonation in high risk areas of Rethymno Prefecture, Crete Island, Greece. Nat Hazards 52: 599-621.

Mitchell A. 2008. The ESRI Guide to GIS Analysis. Volume 2, Spatial Measurements and Statistics, ESRI Press, Redlands, California.

Neaupane K.M, Piantanakulchai M. (2006). Analytic network process model for landslide hazard zonation. Engineering Geology 85: 281–294.

Sakar S, Kanugo D, Mehrotar P. (1995). Landslide zoning : A case study in Garhwal Himalaya, India. Mountain research and development 15 (4): 301-309.

Tajudin N, Yaacob N, mohdali D, Adnan N. (2018). Rainfall – landslide potential mapping using remote sensing and GIS at Ulu Kelang, Selangor, Malaysia. Conference Series Earth and Environmental Science 169 (1):1-8.